

実用マグネシウム合金 AZ31 の温間プレス成形性

大阪府立大学 大学院工学研究科 材料工学分野

助手 高津正秀

(平成 11 年度研究開発助成 AF-99005)

キーワード：深絞り, 引張曲げ, 破断機構

1. 研究の目的および背景

マグネシウムおよびその合金は、実用金属中最軽量で豊富な資源、リサイクル性など多くの優れた性質を有している。特に、高比強度高比剛性であることに加え、制振性、切削性、低い溶解コストなどから、自動車部品としての大きな潜在需要がある。これは、軽量化による省エネルギー、環境負荷の低減という社会的要求に支えられている。また、プラスチックにない放熱性や電磁波遮へい性などからパソコンや携帯電話のケースなどの携帯家電製品にすでに広く使われている。

一方、マグネシウムは HCP 構造で非底面での臨界せん断応力が極端に大きいため延性に乏しく、成形加工品の大部分はダイカスト鋳物である。近年、組織制御による塑性加工性の改善が可能なることから、射出成形、超塑性成形など高温での成形が研究されているが、再結晶温度以下の温間域でも臨界せん断応力の低下による延性の改善は期待できる。BCC との 2 相合金である Mg-8.5Li-1Zn では、室温で絞り比 2.2 が得られているが、大きな肩半径のポンチでかなり小さいひずみ速度で成形している¹⁾。この合金は、高価で低融点で強度も低い。一方、高強度の実用マグネシウム合金 AZ31 (Mg-3mass%Al-1mass%Zn) 圧延板に対し、集合組織、 n 値、 R 値、エリクセン値、ユニカルカップ値などを調べた報告はあるが、深絞り試験は行われていない²⁾。

構造部材としてのマグネシウム合金の需要拡大が期待される中で、その軽さを強調したシェル構造体の生産性および品質を向上させるには、ダイカストからプレス成形への移行が効果的であると考えられる。コストの面からは、できるだけ低温(できれば室温)、高速で、特殊なプロセスや処理を要しない市販の圧延材を用いることが望ましい。本研究は、この AZ31 合金の円筒深絞り成形を、成形が難しいとされる小さい肩半径のポンチで、しかも実用的な速度と温度で実現しようとするものである³⁻⁶⁾。ここでは、温度、速度と限界絞り比 (LDR) の関係およびその破壊機構について検討する。

2. 実験方法

供試材としては、厚さ $t=0.83$ mm (実測値平均) の市販のマグネシウム合金 AZ31 (Mg-3Al-1Zn) 圧延板を用いた。これは、623K で熱間圧延後この温度で 3600s 保持した後矯正したもので、一部の試験を除き、そのひずみ取りと均質化のため 673K で 1800s 焼なまししたものを用いた (特に断らない限り焼きなまし材を使用)。Fig.1 はその光顕組織で、平均粒径は約 20 μ であった。

引張試験は、平行部長さ 18mm、幅 6mm の試験片を用い、温度 $T=293$ K (室温) ~ 573K、ひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1} s^{-1}$ で行った。

深絞り試験は、Fig.2 に示す装置を用い万能試験機でポンチを押すことにより行った。温度は、熱伝対をダイス穴から挿入し、直接素板に接触させて測定し

た。成形は、潤滑材としてシリコンオイルで練った二硫化モリブデンペーストを用い、絞り速度 (ポンチの押し込み速度) $5 \sim 200 mm \cdot min^{-1}$ (ポンチ径に対する比は約 $0.33 \sim 13 min^{-1}$) で行った。この速度は、フランジ内縁の真ひずみ速度に換算すると、約 $0.06 \sim 2.4 s^{-1}$ になる。本装置での標準工具を用いた成形イメージとその主な寸法を Fig.3 に示す。ポンチ肩半径は、板厚の 2.5 倍という小さな値をとっている。素板としては、

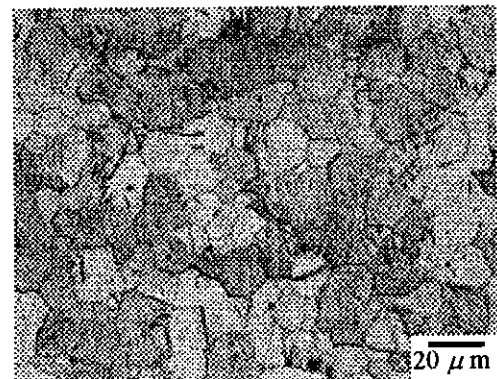


Fig.1 Microstructure of AZ31 rolled sheet annealed at 673K.

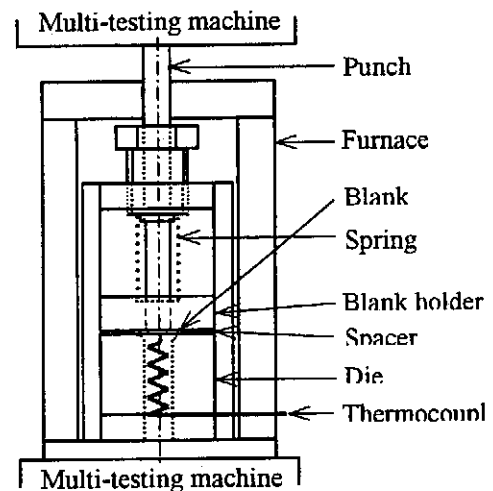


Fig.2 Apparatus used in Deep-drawing test.

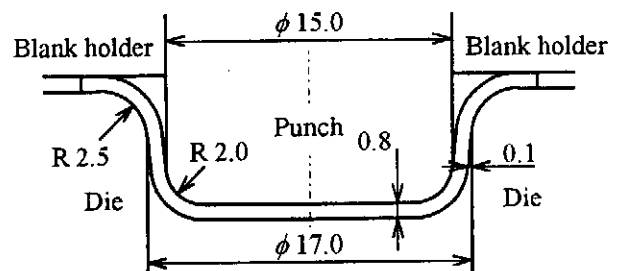


Fig.3 Deep-drawing image with the tools of standard dimensions.

外形 25~36mm(絞り比 1.67~2.4)のものを切削加工により作成した。

この材料 AZ31 の深絞りで見られる特徴的な破断形態(詳細は後述)の原因を調べるため、打抜き試験と引張曲げ試験を行った。打抜き試験では、肩半径 0 のポンチとダイスを用い、ダイス穴半径はポンチとのクリアランスが 0.1t となるようにした。また、絞りとの中間的な条件での挙動を調べるため、絞りと同じ穴径に広げたダイスや、より小さい肩半径 1.0mm のポンチとダイスを用いたを行った。

引張曲げ試験⁷⁾は、幅 20mm の試験片を、深絞りの標準ポンチと同じ肩半径 2.0mm のダイス上に緩んだ状態でセットし、初期引張応力 11.7MPa を加えた後、応力を一定の応力負荷速度(以下応力速度と呼ぶ) 1.17MPa·s⁻¹ で増加させることにより行った。この応力速度は、速度効果が大きくなる 413~453K での深絞り(絞り比 1.67, 絞り速度 5mm·min⁻¹)において側壁部に作用する平均応力速度に合わせている。

3. 実験結果および考察

3.1 引張特性

室温および 433K での引張試験における公称応力-公称ひずみ曲線を Fig.4 に示す。焼きなまし前の試料でも、室温で 20% 近く伸びるが、局部伸びは全く見られない。焼きなましにより全伸びは 25% に達するが、局部伸びはほとんどない。温度の上昇に伴って、流動応力が低下するとともに局部伸びは飛躍的に向上

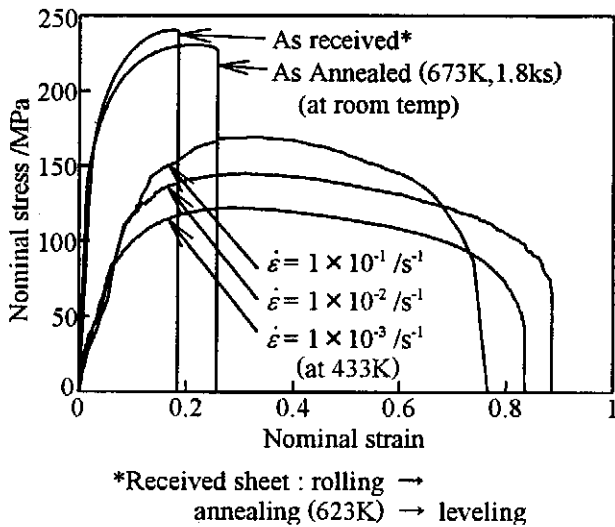


Fig. 4 Nominal stress - nominal strain curves in tensile tests.

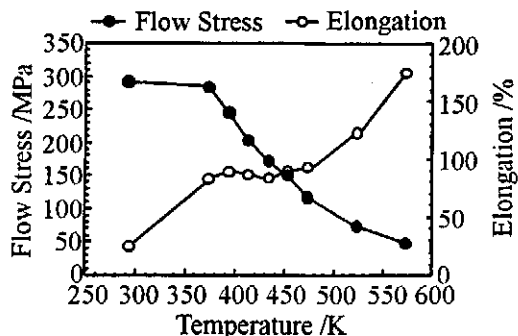


Fig. 5 Effects of temperature on flow stress and elongation in tensile tests of AZ31 rolled sheets.

する。同時にひずみ速度の影響が大きくなるが、433K でもひずみ速度感受性指数は超塑性変形と比べると一桁小さい。

Fig.5 に温度上昇に伴う流動応力(降伏応力)と全伸びの変化を、Fig.6 に n 値と R 値の変化を示す。これらはひずみ速度 1×10⁻²s⁻¹ での値で、流動応力は真ひずみ 0.2 での真応力である。373K では、流動応力は室温と大差ないが、伸びが大幅に向上している。これは、局部伸びの増加によるものである。n 値, R 値も温度の上昇に伴って低下する。特に R 値は 473K では 1 以下になってしまう。

4.1 深絞り特性

深絞り試験において、絞り比および絞り速度は、特に断らない限り、本実験の範囲で最小の 1.67 および最低速の 5mm·min⁻¹ とする。Fig.7 は、絞り比 1.67(手前)および 2.00(奥)での室温成形における破断状況を示す。左側は焼きなましせず絞った場合で、Fig.8 に模式的に示すように、ポンチ肩上のカップ底部に近いところで脆性的に割れているのが特徴的で

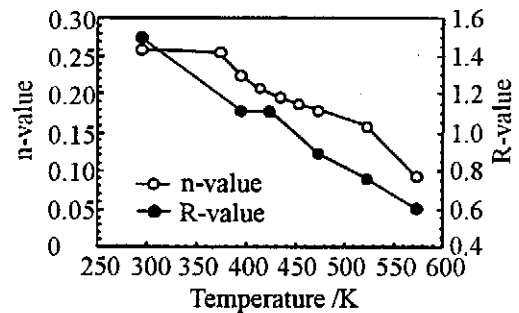


Fig.6 Effects of temperature on r-value and n-value in AZ31 alloy.

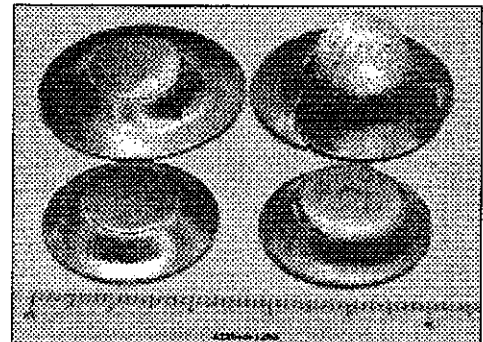


Fig. 7 Blanks drawn at room Temperature (Rights are pre-annealed at 673K, Drawing ratio : 1.67 and 2.0).

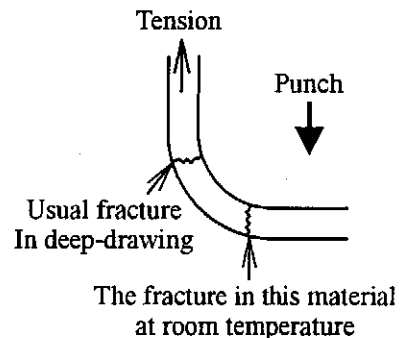


Fig. 8 Illustration of characteristic fracture position in deep-drawing of AZ31 alloy at room temperature.

ある。この破断位置は、焼きなましにより少し側壁側に移動するが、いずれの場合も素板がポンチ肩に沿って曲げられる絞り初期の段階で破断している。

Fig.9 は成形温度の上昇に伴う LDR(限界絞り比)の変化を示す。この LDR を示す線は、Fig.10 に示すような完全な成形品が得られる点を結んだものであり、その 10K 左では絞り込めるが肩部に微小なクラックが残るので不可としている。本実験での最低の絞り比 1.67 での成形は 383K で可能となる。LDR は、453K までは直線的に向上し 2.2 に達するが、その後、頭打ちとなる。この上昇過程で、限界を超えた場合の破断位置は、しだいに側壁側に移動し、453K では Fig.8 に示した通常の深絞りでの破断位置に達する。そして、破断形態も板厚くびれを伴った延性破断となる。したがって、LDR がこの温度で頭打ちとなるのは、前述の R 値の低下によるものと考えられ、この絞り速度では、これ以上の温度上昇は LDR の向上に効果がないといえる。

Fig.11 は、絞り速度の変化に伴う絞り可能な最低温度および最大応力の変化を示す。ここで、最大応力

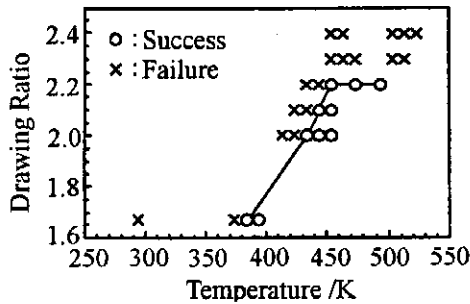


Fig. 9 Effect of temperature on limiting drawing ratios (LDR).

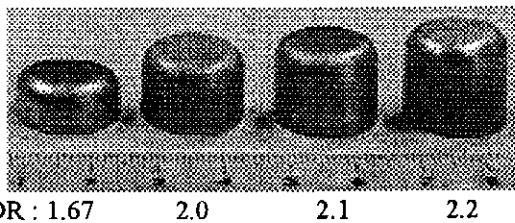


Fig.10 Products of several drawing ratios.

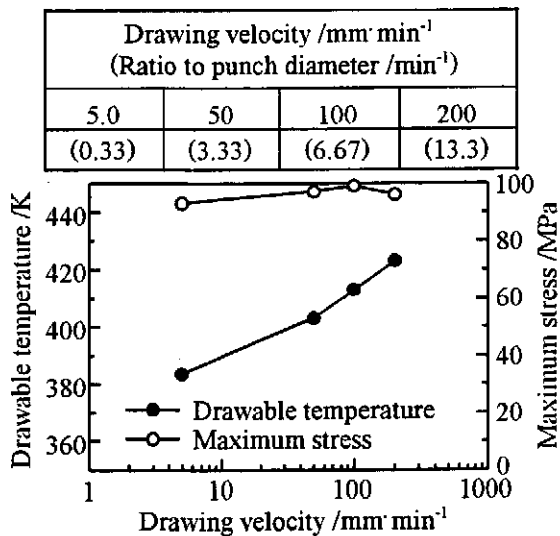


Fig.11 Effects of drawing velocity on drawable temperature and maximum stress (DR=1.67).

とは、クラックを生じずに絞り込める限界条件(温度、速度ともに変化)のもとでの、絞り過程における最大荷重を側壁部断面積で割ったものである。絞り可能な最低温度は、絞り速度の増大に伴って上昇するが、最大応力はほとんど変化していない。すなわち、流動応力の速度増加による増加が温度上昇による減少により相殺されており、破断はこの一定応力を超えたときに生じることになる。

3.2 深絞りにおける破断原因の考察

室温での深絞りにおける脆性的な破断は、Fig.7 に示したように、打抜き加工におけるせん断破壊のような様相を呈する。そこで、確認のため、Fig.12 に示すような打ち抜き試験および打抜きと深絞りの中間的な試験を行った。図中の(A)は打抜き、(B)はこれに深絞りと同じクリアランスを与えたもの、(C)はポンチ側に 1mm の小さな肩アールを、(D)はダイス側にも同様の肩アールを与えたものである。なお、ここでの破断応力は、公称値で単位断面積(ポンチ周長×初期板厚)当たりのポンチ荷重である。破断応力は、(A)の打抜き(せん断)の条件では極めて大きい値を示し、深絞りの要素が増すにつれて小さくなっている。

Fig.13 は、温度を変えて Fig.12(D)の極めて小さい肩半径 1.0mm(板厚の 1.25 倍)での深絞りを行った場合の最大応力(ポンチ荷重/側壁部断面積)の変化を示す。温度が 413K 以上になると、このような過酷な条件でも絞り比 1.67 の深絞りは可能であり、これ未満では公称破断応力が最大応力となる。破断応力は温度の上昇とともに流動応力(降伏応力)の低下にもかかわらず増加している。

以上の結果から、低温での特徴的な破断が、ポンチ肩部での強い引張応力下での曲げによるものではないかと考え、標準のポンチ肩半径と同じ肩半径 2.0mm(板厚の 2.5 倍)のダイスを用いて引張曲げ試

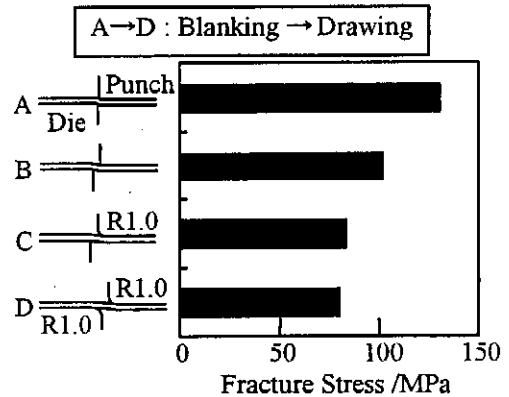


Fig.12 Fracture stress at room temperature under several tool conditions.

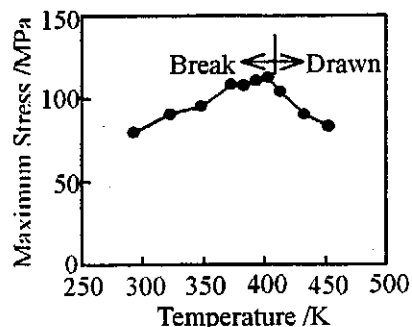


Fig.13 Deep Drawing test with $R_p = R_d = 1.0$ mm and DR = 1.67.

験を行った。Fig.14 は引張曲げ試験における公称破断応力(引張荷重/初期断面積)の温度上昇に伴う変化を示す。この試験は、深絞りにおけるポンチ肩上下の素板の変形を実験的にシミュレートしようとしたものであり、前述のように、絞り比 1.67 の深絞り時の高温側での平均的な負荷速度で行っている。公称破断応力は、室温ではかなり低い、温度の上昇に伴って急速に増加し、373K を境に減少に転じる。この公称破断応力の減少には、断面積の減少が大きく関与していることが、この温度以上で全体的な伸びが生じていることから推察される。そして、この破断応力が最大となる温度 373K は、絞り比 1.67 での成形が可能な最低温度とほぼ一致している。なお、引張強さの 10%未満の小さい張力下での回転曲げによる引張曲げ試験(肩半径は同じ)も別途行っており、この場合には焼きなましなしでも破断は生じなかった。

Fig.14 の低温側での温度上昇に伴う破断応力の増加は、破断限界における曲げ部の真応力分布の模式図 Fig.15 で説明できる。図の横軸は、破断時の板厚に対する曲げの内側表面からの距離の比をとっている。したがって、位置 0~1 での積分値に断面積を掛けたものが引張荷重となる。破断応力(真応力)の温度および速度依存性は流動応力(降伏応力)に比べて十分小さいと考えられ、ここではこれを一定値とする。図から分かるように、曲げの外側表面がこの破断応力に達したときの中立面の移動量は、応力-ひずみ曲線の応力値が全体に大きい(傾きが大きい)ほど小さくなる。その結果、図に示すような条件(高温で速

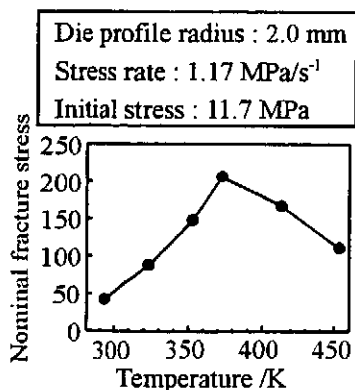


Fig.14 Changes of nominal fracture stress in the stretch-bending tests with elevating temperature.

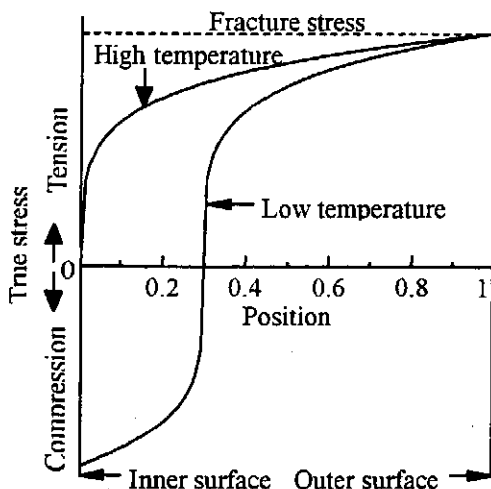


Fig.15 Schematic diagram of stress distribution in bent portion.

度を変えた場合には高速が低温に対応)では、断面積の変化を考慮しても低温の方がはるかに破断荷重は小さくなる。このことは深絞りにおいても同様であり(Fig.13 参照)、引張曲げ試験片の断面積をカップ側壁部の断面積に置き換えれば、臨界ポンチ荷重が得られる。そして、フランジ部を引き込むのに要する力の絞り過程における最大値がこの臨界値に等しくなるような絞り比が、LDR となる。なお、高温(低速)で断面積の減少が大きい場合には、必ずしも破断荷重が臨界ポンチ荷重とはならない。このような場合には、通常深絞りと同様に R 値が LDR を左右するものと考えられる。

4. 結言

実用マグネシウム合金 AZ31 圧延板の円筒深絞り成形を、通常この材料では難しいとされる小さい肩半径(板厚の 2.5 倍)のポンチを用いて行い、成形条件と限界絞り比の関係を調べた。その結果、本実験条件では、温度 453K、絞り速度 0.33 min^{-1} (ポンチ径で割った値)で最大の LDR, 2.2 が得られた。また、絞り比 1.67 で成形可能な最低温度は、上記の速度では 383K、 13 min^{-1} では 423K であった。室温の成形では、素板がポンチ肩に沿って曲げられる絞り初期の段階で、ポンチ肩上下のカップ低部に近いところで脆性的に破断した。そして、この破断が、絞り過程で生じる強い引張応力下での曲げにより生じていることが、引張曲げ試験により明らかになった。これらの基本的な実験結果と応力解析を組み合わせることにより、種々の寸法の成形に対するこの材料の LDR は、理論的に計算可能と思われる。

最後に、本研究を進めるに当たって、重要なお助言を頂くとともに、引張曲げ試験およびその解析において研究協力頂いた、広島大学工学部の吉田総仁教授に厚く感謝致します。

参考文献

- 1) 宅田裕彦, 江南貴司, 塚田虎之, 久保田耕平: 第 49 回塑加連講論, 335-336, (1998, 11 月, 八王子).
- 2) J.Kaneko, M.Sugamata, M.Numata, Y.Nishikawa and H.Takada: J. Japan Inst. Metals, 64-2, 141-147, (2000).
- 3) 高津正秀, 田辺重則, 染川英俊, 東 健司, 染川英俊, 渡辺博行, 向井敏司: 第 43 回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集, 342-343, (1999, 9 月, 京都).
- 4) 高津正秀, 染川英俊, 東 健司: 第 50 回塑性加工連合講演会講演論文集, 205-206, (1999, 10 月, 福岡).
- 5) 高津正秀, 染川英俊, 田辺重則, 東 健司: 日本金属学会第 125 回大会講演概要, 470, (1999, 11 月, 金沢).
- 6) H Somekawa, M Kohzu, S Tanabe and K Higashi: Materials Science Forum, 350-351, 177-182, (2000).
- 7) 吉田総仁, 八木竜一, 大森正信: 塑性と加工, 26 -291, 400-408, (1985).